

CUANTIFICACION DE LA VELOCIDAD DE TRANSFERENCIA DE CALOR ENTRE LA FASE DENSA DE UN LECHO FLUIDIZADO Y UNA SUPERFICIE SUMERGIDA A ALTAS TEMPERATURAS POR FLUIDODINAMICA COMPUTACIONAL (CFD)

José M. Soria^a, Mariana T. Zambon^a, Guillermo F. Barreto^b y Germán D. Mazza^a

^a*Departamento de Química, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Comahue y Unidad Ejecutora Neuquén (Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas-CONICET-UNComa), Buenos Aires 1400, 8300 Neuquén, Argentina, gmazza@uncoma.edu.ar,*

<http://uncoma.edu.ar>

^b*PROIRQ y CINDECA, Universidad Nacional de La Plata, Calle 47 esq. 1, 1900 La Plata, Argentina, barreto@quimica.unlp.edu.ar, <http://ing.unlp.edu.ar>*

Palabras Clave: Lecho Fluidizado, Emulsión, Transferencia de Calor, Fluidodinámica Computacional.

Resumen. Existen en bibliografía numerosos trabajos referidos al estudio de la transferencia de calor entre un lecho fluidizado y una superficie sumergida, tanto en lo concerniente a la modelización del fenómeno como a determinaciones experimentales. No obstante, persiste aún gran dispersión en la información. Este trabajo se concentra en la determinación, a través de la Fluidodinámica Computacional, del coeficiente de transferencia de calor por radiación entre la fase densa y la pared de una superficie sumergida. La simulación por CFD, procesada con el *software* FLUENT 6.3.26, se llevó a cabo sobre una celda formada por un arreglo de partículas sólidas limitadas por una pared (superficie sumergida) y atravesadas por una corriente gaseosa paralela a la misma (gas intersticial). Para las propiedades radiantes requeridas por FLUENT (coeficientes de dispersión y absorción) se aplicó la teoría de Mie. Las condiciones operativas y el tamaño de partículas determinan que el aporte conductivo y radiante a la transferencia de calor lecho – pared sean predominantes. Se utilizó el método de Ordenadas Discretas en la resolución de la transferencia de calor radiante en FLUENT. El objetivo es presentar resultados del coeficiente radiante debido a la emulsión obtenidos mediante CFD conjuntamente con los calculados a partir del Modelo Heterogéneo Generalizado (Mazza, *Tesis Doctoral*, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata, Argentina, (1993)) y contrastarlos con datos experimentales reportados.

1 INTRODUCCION

Durante la operación de un Lecho Fluidizado Burbujeante (LFB), la superficie sumergida contacta, alternativamente, porciones de burbujas y fase densa o emulsión.

La emulsión consta de partículas y gas intersticial agitados por el pasaje de las burbujas. Ello permite considerar la existencia de paquetes o agregados de fase densa, cuya temperatura es la temperatura promedio del lecho, valor que mantendrán hasta el instante en que contactan la pared de la superficie de intercambio. A partir de ese momento, se intercambia calor con la pared, mediante un mecanismo esencialmente transiente.

El tiempo en el cual la emulsión transfiere calor hacia la superficie sumergida se denomina “tiempo de contacto”. Durante este tiempo, se supone que las partículas no se mueven, y se considera que el mismo ha transcurrido cuando el pasaje de una burbuja remueve el agregado de su ubicación, devolviéndolo al seno del lecho donde retoma las propiedades del mismo (esencialmente T_F).

En el fenómeno de transferencia de calor entre un lecho fluidizado y una superficie sumergida, se reconoce la presencia de dos contribuciones: una primera contribución debida a la fase densa y una segunda generada a partir de la fase complementaria a la emulsión, correspondiente a la fase burbuja.

Luego, el coeficiente total de transferencia de calor se puede escribir como:

$$h = h_D(1 - f_B) + h_B f_B \quad (1)$$

donde f_B es la fracción volumétrica de burbujas presentes en el lecho que se supone coincidente con la fracción de tiempo que las burbujas están en contacto con la superficie y, h_D y h_B son los coeficientes de transferencia de calor debido a la fase densa y a la fase burbuja, respectivamente

A temperaturas mayores a 500 °C, la transferencia de calor por radiación comienza a ser significativa. Para este caso, la componente radiante del coeficiente de transferencia de calor total viene dada, en forma consistente con la ecuación (1), por:

$$h_{rad} = h_{rad,D}(1 - f_B) + h_{rad,B} f_B \quad (2)$$

En lo concerniente a la transferencia de calor por radiación, frecuentemente ha sido evaluada desde la suposición de un comportamiento de lecho isotérmico sin interacción con los restantes mecanismos. En pocos casos, el acoplamiento entre los mecanismos radiantes y conductivos ha sido modelado, ignorando los efectos de la convección del gas (numerosas referencias son citadas por [Mazza et al. 1997a](#)).

De los modelos existentes en bibliografía para representar el proceso de transferencia lecho-pared de la superficie sumergida, no todos son aplicables a altas temperaturas debido a la influencia de la componente radiante. [Flamant et al. \(1993b\)](#) y [Lu et al. \(1993a\)](#) han propuesto un modelo riguroso de estructura pseudo-continua. Recientemente [Wang et al. \(2005\)](#) han propuesto una modelización similar aunque la validación de sus resultados se realizó con situaciones no extremas. En acuerdo a la naturaleza discontinua del agregado, [Mazza \(1993\)](#) formuló y validó el Modelo Heterogéneo Generalizado (MHG) que se utilizará también en este trabajo.

La presentación detallada de la estructura y el comportamiento del MHG puede hallarse en publicaciones precedentes. Se incluirá aquí una descripción completa aunque menos detallada, a fin de contextualizar el trabajo y sus resultados. Adicionalmente, dado que se compararán los valores de flujos radiantes y coeficientes de transferencia con resultados experimentales de [Ozkaynak et al. \(1981\)](#), se describirá sucintamente su procedimiento para las respectivas mediciones.

En este contexto, el objetivo de este trabajo será la comparación de resultados de transferencia de calor radiante entre la pared de la superficie sumergida y la fase densa, evaluados por CFD con los correspondientes valores experimentales (Ozkaynak et al. 1981) y de modelización por MHG (Mazza, 1993). Cuando sea necesario conocer $h_{rad,B}$, se estimará a través de la expresión propuesta por Yoshida et al. (1974).

2 DESCRIPCION DE LOS ELEMENTOS EXPERIMENTALES Y DE MODELIZACION A UTILIZAR

2.1 Experiencia de Ozkaynak et al. (1981)

Se utilizaron partículas de arena en dos tamaños cuyos diámetros promedio fueron de 0.733 y 1.03 mm. La fluidización se llevó a cabo a presión atmosférica en un lecho fluidizado de 45 cm de diámetro, hasta temperaturas de 800 °C y velocidades superficiales del gas que alcanzaron los 5 m/s, utilizando como agente fluidizante gases de combustión (CO₂ y H₂O) y aire en exceso. La cantidad de aire se utilizó para regular la temperatura.

Para evaluar la velocidad de transporte radiante, estos autores emplearon una sonda (de 73 mm de diámetro y ubicada a 0.381 m por sobre el distribuidor) con una ventana transparente de seleniuro de zinc (SeZn) de diámetro igual a 25.4 mm. Este material posee una conductividad térmica muy alta y una ancha banda de transmitancia, lo cual determina que sea más adecuado que el cuarzo, de uso más frecuente. Una segunda ventana del mismo material, instalada en el interior del dispositivo, recibe y transmite solamente energía radiante debido a que el espacio entre ambas ventanas fue barrido con circulación de aire frío. El flujo radiante fue medido mediante una termopila. El dispositivo completo (ver Figura 1) fue refrigerado también por circulación de agua, y la cantidad de calor total transferido desde el lecho se evaluó a partir de los cambios de entalpía de las corrientes refrigerantes de agua y aire. Un aspecto que distingue este trabajo, minuciosamente llevado a cabo, es que la temperatura de la ventana fue medida y se verificó su uniformidad.

El flujo radiante que alcanzó la termopila se evaluó considerando que la misma, debido a la adecuada refrigeración, permaneció a $T_s = 298$ K.

Los autores reportan todos los valores de las propiedades y características del sistema necesarias para simular el proceso de transferencia de calor, excepto U_{mf} a la temperatura de operación, e_p y la composición precisa del gas.

En la Tabla I: se resumen las distancias geométricas correspondientes al diámetro del lecho D_L , diámetro de la sonda d_T y distancia de ésta al distribuidor ϕ , junto con las dimensiones y propiedades de la arena y la ventana de SeZn utilizadas en la experiencia.

Características Geométricas	D_L [m]	ϕ [m]	d_T [mm]		
	0.45	0.381	73		
Material	d [mm]	ρ [Kg/m ³]	k [W/(m K)]	C_p [J/(Kg K)]	
Arena	0.733	2670	1.87	845	
Ventana de SeZn	25.4	5270	18	338	

Tabla I: Características geométricas y propiedades de los materiales utilizados en Ozkaynak et al. (1981)

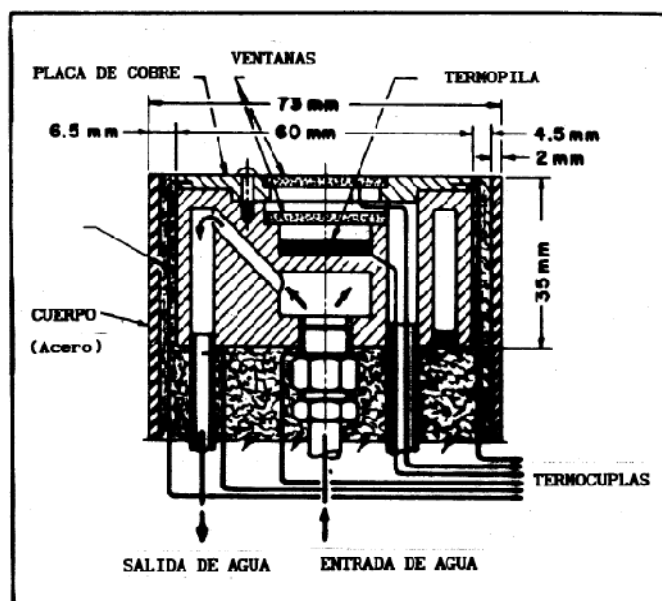


Figura 1: Esquema de la sonda utilizada por [Ozkaynak et al. \(1981\)](#)

2.2 Modelo Heterogéneo Generalizado (MHG)

2.2.1 Presentación preliminar

En la mayoría de los trabajos existentes en la literatura la evaluación de las diferentes contribuciones al coeficiente global se lleva a cabo en forma independiente y luego se procede a su simple adición para generar el coeficiente total. Se ignoran así todas y cada una de las complejas interrelaciones de los mecanismos que las diferentes contribuciones representan.

El modelo (MHG) es un modelo mecanístico para evaluar las velocidades de transferencia de calor entre la fase densa de un lecho fluidizado por gas y una superficie sumergida que se formula en términos de propiedades efectivas para las partículas y el gas intersticial.

Las bases para el MHG, sus formulaciones matemáticas y validaciones han sido rigurosamente presentadas por [Mazza et al. \(1997a\)](#). Una breve descripción del modelo y su formulación serán incluidas aquí.

2.2.2 Características principales

Para la representación completa del agregado, se utilizó una combinación de enfoques: el enfoque pseudo-continuo a partir de una cierta distancia desde la pared, y un modelo de estratos (discreto) para describir el comportamiento del sistema hasta distancias equivalentes aproximadamente al valor del diámetro de partícula desde la pared. Así, la concepción del MHG considera dos zonas, la primera que abarca una capa de partículas adyacentes a la pared junto con el gas intersticial que las atraviesa, denominada Zona Heterogénea, y la segunda consistente en el resto del agregado de la fase densa representada a través de un medio pseudo-continuo y pseudo-homogéneo designada como Zona Pseudohomogénea, constituyendo la base del Modelo Heterogéneo Generalizado (MHG).

Se reconocen campos de temperatura diferentes para el sólido y el gas en la Zona Heterogénea. Sin embargo, para la Zona Pseudohomogénea la diferencia entre temperatura del gas y de los sólidos es muy pequeña ([Mazza y Barreto, 1993](#); [Flamant et al. 1992](#); [Lu et al. 1993a](#)). Por lo tanto para esta zona no existe la necesidad de discriminar entre temperatura del gas y del sólido. Un esquema cualitativo de los perfiles de las dos zonas se muestra en la [Figura 2](#).

Con respecto a la transferencia de calor radiante, el MHG no tiene en cuenta la participación de la capa de gas, debido a las pequeñas longitudes de penetración térmica. En este caso, el flujo radiante dependerá solamente de las propiedades, condiciones y posición relativa de las superficies sólidas.

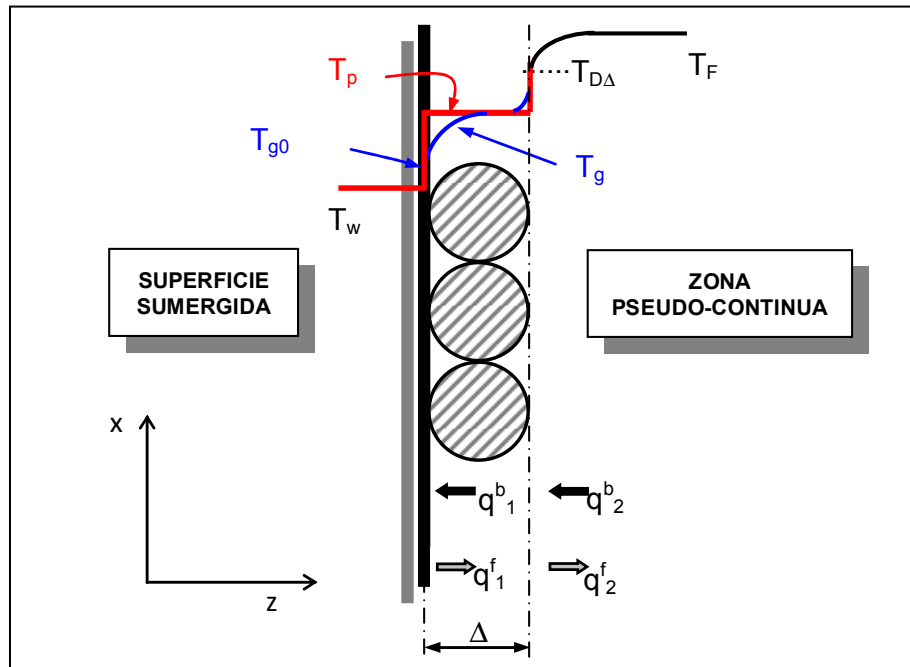


Figura 2: Esquema de la fase densa en contacto con la superficie sumergida según el MHG

2.2.3 Formulación del MHG para la fase densa

Se considera una superficie vertical de longitud L_w en contacto con un agregado de partículas que permanece sobre la misma un tiempo de contacto t_c durante el cual se produce un intercambio de energía. Transcurrido este tiempo, el agregado es removido por el pasaje de burbujas y enviado al seno del lecho.

Los efectos conductivos en sentido paralelo a la pared (en el sólido y en el gas para la zona adyacente a la pared y en la Zona Pseudohomogénea) son ignorados en la formulación del modelo, debido a que su efecto es casi siempre despreciable.

Las propiedades radiantes de la capa de partículas son definidas por a_L, r_L, t_L . Para la emisión desde la capa de partículas hacia la superficie se emplea una temperatura media de cara frontal, T_{rad} , mientras que para la emisión hacia la Zona Pseudohomogénea se utiliza la temperatura media de la pastilla, T_p .

Se ha comprobado (Mazza et al. 1997b) que la temperatura media en la cara frontal de la partícula (enfrentada a la pared) puede diferir significativamente de la temperatura media de la partícula T_p , en particular si estos sólidos poseen relativamente bajas conductividades. T_{rad} se relaciona con T_p del siguiente modo:

$$T_{rad} = T_p - \Phi(T_p - T_w) \quad (3)$$

donde $\Phi = 1.1\eta Nu_{wp}/(f_w K)$ de acuerdo a Mazza et al. (1997a).

2.2.4 Parámetros del MHG

La mayoría de las ecuaciones empleadas, presentadas por [Mazza et al. \(1997a\)](#) se resumen en la [Tabla II](#):

Tabla II: Expresiones para los parámetros térmicos y estructurales

Parámetros incluyendo los efectos convectivos	
$Nu_{pg} = 2 + 0.6 \frac{Re_D^{0.57} Pr^{0.33}}{\delta_D}$; Beek, 1970
$Nu_{wg} = 5\delta_D^{2.4} + 0.2Re_D^{0.8} Pr^{0.33}$; Yagi y Wakao, 1959
$k_{eg} = \delta_D k_g + 0.1k_g Re_D Pr$; Yagi y Kunii, 1957
Parámetros conductivos en el sólido	
$k_{ep} = 0.895k_g \frac{(1 - \delta_D)}{[\theta(1 - K^{-1})]^2}$; Kunii y Smith, 1960, modificada incluyendo el término $L_s = 2 \ell_s / \ell_0$;
$\theta \begin{cases} \theta_2 & \delta_D < 0.26 \\ \theta_2 + (\theta_1 - \theta_2)(\delta_D - 0.26)/0.216; & 0.26 < \delta_D < 0.476 \\ \theta_1; & \delta_D > 0.476 \end{cases}$	
$\theta_1 = 0.333[(1 + L_s/2) \ln(1 + 0.423(K - 1)/(1 + K L_s/2) - 0.423(1 - K^{-1}))^{-1}]$	
$\theta_2 = 0.072[(1 + L_s/2) \ln(1 + 0.075(K - 1)/(1 + K L_s/2) - 0.075(1 - K^{-1}))^{-1}]$	
Parámetros radiantes	
$r_L = \frac{1}{3} \pi (1 - e_p) n_p [1 + \beta_r n_p^{1.41}]^{-0.5}$	
$a_L = \frac{1}{2} \pi e_p n_p [1 + \beta_a n_p^{1.74}]^{-0.5}, t_L = 1 - r_L - a_L$	
donde	$\beta_r = \frac{(1.456e_p + 0.484)}{(1 + 0.16e_p)}, \beta_a = \frac{(1.967e_p + 0.0033)}{(1 + 0.07e_p)}, e_L = a_L$
$n_p = N_p d_p^2, \quad e_D = 1 - \xi + (\xi^2 - 1)^{1/2} \text{ y } \xi = 0.5 \left[\frac{1 + r_L^2 - t_L^2}{r_L} \right]$	
$k_{rad} = 4\Delta\sigma T_F^3 [(a_L + 2t_L)/(a_L + 2r_L)]_D$	

La velocidad superficial promedio y la porosidad en el seno de la fase densa, U_D y δ_D , tienen una influencia moderada sobre la velocidad de transferencia de calor. A la porosidad se le asigna el valor en las condiciones de mínima fluidización,

$$\delta_D = \delta_{mf} \quad (4)$$

El valor de la velocidad superficial promedio se determina mediante el uso de la ecuación propuesta por [Decker y Glicksman \(1983\)](#),

$$U_D = U_{mf}(1 + 2f_B) \quad (5)$$

Los efectos intersticiales en la zona adyacente a la pared están dominados por la capacidad calorífica del sólido; si bien la acumulación de energía en el gas intersticial y el transporte convectivo por el mismo están incluidos en la formulación, no tienen mucha influencia ([Mazza et al. 1997a](#)). Esto es debido a que el término, $C_{pg}U_g$, que representa el transporte de energía por convección es bajo respecto a la capacidad calorífica de las partículas. Luego, a los fines prácticos se considera que:

$$U_g = U_D \quad (6)$$

Si bien existen variaciones abruptas de la velocidad local de gas en una zona extendida a lo largo de aproximadamente un diámetro de partícula desde la pared, los valores medios se aproximan a U_D ([Papageorgiou y Froment, 1995](#)). Mayores esfuerzos para evaluar U_g no

parecen relevantes, ya que si se disminuye a la mitad o se aumenta al doble el valor de U_g , el valor de h_D se modifica, a lo sumo, en 2 - 3% (Barreto y Mazza, 1996).

El balance de energía en la zona Heterogénea introduce dos parámetros estructurales: el número de partículas adyacentes a la pared, N_p , y el espesor de la zona heterogénea, Δ . La estimación de N_p es discutida por Mazza et al. (1997a, b). Los valores allí recomendados son:

$$N_p = 0.58 N_{p,mf} \text{ para partículas Geldart A} \quad (7)$$

$$N_p = 0.74 N_{p,mf} \text{ para partículas Geldart B y D} \quad (8)$$

donde $N_{p,mf}$ se evalúa en condiciones de mínima fluidización (con $\delta_D = \delta_{mf}$) a partir de la ecuación resultante para el modelo de estratos múltiples con el arreglo espacial de partículas seleccionado como el más probable en forma coherente con información experimental (Mazza et al. 1991); finalmente,

$$N_{p,D} = 1.411(1 - \delta_D)^{2/3} d_p^{-2} \quad (9)$$

$$\Delta = 0.7387(1 - \delta_D)^{-1/3} d_p \quad (10)$$

Conocido el valor de Δ , la porosidad en la zona Heterogénea se estima a través de la ecuación:

$$\delta_g = 1 - \pi N_p d_p^3 / (6\Delta) \quad (11)$$

El coeficiente de transferencia de calor h_L describe la velocidad de transferencia entre la primera capa de partículas y las partículas vecinas ya pertenecientes a la Zona Pseudohomogénea. Este proceso tiene lugar alrededor de los puntos de contacto entre partículas y, a semejanza de h_{wp} , corresponde a un mecanismo conductivo; h_L fue estimado previamente (Mazza y Barreto, 1993) mediante el modelo de múltiples estratos. El coeficiente h_L se vincula con la conductividad térmica efectiva de las partículas k_{ep} , según:

$$h_L = k_{ep} / \Delta \quad (12)$$

Esta ecuación tiene implícito que la concentración de partículas en las capas corresponde al valor calculado por (9). Sin embargo, los valores de N_p dados por (8) resultan menores. Por consiguiente, los autores proponen una corrección de la ecuación anterior dada por:

$$h_L = (N_p / N_{p,D}) k_{ep} / \Delta \quad (13)$$

Se acepta en esta ecuación que el coeficiente de transferencia de calor para cada partícula individual en la primera capa es independiente de N_p . La conductividad k_{ep} se evalúa según indica la Tabla II.

Debe señalarse que cualquier esfuerzo adicional posterior en la evaluación de h_L parece no ser significativo, ya que el coeficiente de transferencia h_D muestra una baja sensibilidad con respecto a h_L .

En este trabajo se utilizó para calcular h_{wp} la relación

$$Nu_{wp} = 8 - 12 \quad (14)$$

y en particular $Nu_{wp} = 8$. Se adoptó esta modalidad por la naturaleza preliminar del estudio comparativo del MHG. No obstante, habiendo sido propuesta una expresión para la evaluación rigurosa de h_{wp} (Barreto y Mazza, 1996), una próxima etapa del trabajo involucrará la comparación de estos valores con los obtenidos a partir de CFD a fin de validar nuevamente el uso de la expresión propuesta.

2.2.5 Expresiones para evaluar el flujo de transferencia de calor

Las ecuaciones de conservación para el MHG han sido detalladas previamente (Mazza, 1993; Mazza et al. 1997a)

Se define el coeficiente de transferencia de calor radiante debido a la fase densa como:

$$h_{rad,D}^{[MHG]} = \frac{\Delta q_1}{T_F - T_W} = \frac{\sigma}{D} \left\{ \frac{a_L [1 + (a_L + t_L)Y] (T_{rad}^4 - T_W^4) + a_L t_L Y (T_P^4 - T_W^4) + t_L (T_{D\Delta}^4 - T_W^4)}{T_F - T_W} \right\} \quad (15)$$

Los valores medios de temperatura en la primera capa de partículas T_P , en el gas intersticial adyacente a la pared T_{g0} , y en el límite de la Zona Pseudohomogénea $T_{D\Delta}$, (las tres temperaturas se refieren a valores promedios en el t_c y L_w) se obtienen de resolver el sistema (16).

$$\mathbf{A} \begin{bmatrix} T_{g0} - T_F \\ T_P - T_F \\ T_{D\Delta} - T_F \end{bmatrix} = (T_W - T_F) \begin{bmatrix} h_{wg} \\ h_{wp} \\ 0 \end{bmatrix} + \frac{\sigma}{D} \mathbf{R} \begin{bmatrix} T_P^4 - T_W^4 \\ T_{rad}^4 - T_W^4 \\ T_D^4 - T_W^4 \end{bmatrix} \quad (16)$$

Los coeficientes de las matrices \mathbf{A} y \mathbf{R} (3x3) se definen en la Tabla III.

Tabla III: Componentes de las matrices A y R

Componentes de la matriz simétrica A		
$a_{11} = h_{wg} + c_1 H_g$,	$a_{12} = -H_{pg} \gamma_g (c_1 - c_2)$,	$a_{13} = -c_2 H_g$
$a_{22} = h_{wg} + C_p + h_L + \frac{\alpha_g H_{pg} - 2a_{12}}{1 + \alpha_g}$,	$a_{23} = a_{12} - h_L$,	$a_{33} = h_L + H_D + c_1 H_g$
donde:		
$H_{pg} = \pi N_p d_p^2 h_{pg}$,	$C_p = \frac{\pi C_{p,p} N_p d_p}{3 t_c}$,	$H_D = \left[4 k_e \frac{(C_{p,D}/t_c + C_{p,g} U_D/L_w)}{\pi} \right]^{1/2}$
$C_g = 4 C_{p,g} \Delta \frac{(\delta_g/t_c + U_g/L_w)}{\pi}$,	$H_g = \left[(C_g + H_{pg}) \left(\frac{k_{eg}}{\Delta} \right) \right]^{1/2}$	
$k_e = k_{eg} + k_{ep} + k_{rad}$,	$C_{p,D} = (1 - \delta_D) C_{p,p} + \delta_D C_{p,g}$	
$\alpha_g = \frac{C_g}{H_{pg}}$,	$\gamma_g = \frac{k_{eg}/\Delta}{H_g}$,	$c_1 = \coth(1/\gamma_g)$, $c_2 = \operatorname{csch}(1/\gamma_g)$
Componentes de la matriz radiante R		
$b_{11} = b_{12} = b_{13} = 0$		
$b_{21} = -a_L [1 + (a_L + t_L)W + t_L Y]$,	$b_{22} = -a_L [1 + (a_L + t_L)Y + t_L W]$,	$b_{23} = a_L + \varphi W$,
$b_{31} = a_L [1 + (a_L + t_L)W]$,	$b_{32} = a_L t_L W$,	$b_{33} = -(a_L + t_L + \varphi W)$
donde:		
$D = 1 + \varphi W Y + (a_L + t_L)(W + Y)$,	$\varphi = a_L(a_L + 2t_L)$,	$W = \frac{1 - e_W}{e_W}$, $Y = \frac{1 - e_D}{e_D}$

2.3 Evaluación del intercambio de calor radiante con la fase burbuja

El intercambio de calor por radiación entre la fase burbuja y la superficie sumergida tiene lugar durante el contacto de las burbujas con la pared. La emisividad de la superficie interna de la burbuja es esencialmente la correspondiente a la fase densa isotérmica, e_D , a temperatura T_F .

Si se considera la complejidad introducida en el sistema por factores tales como la distribución de tamaño de burbujas, formas de las mismas (usualmente distorsionada por la presencia de la superficie sumergida) y las infinitas posiciones relativas en las cuales una

burbuja individual puede interactuar con la pared de la superficie sumergida, es necesario adoptar ciertas simplificaciones geométricas cuando se intenta cuantificar la velocidad de intercambio de calor radiante.

Yoshida et al. (1974) consideraron a las burbujas como un medio transparente (debido a las dimensiones de las burbujas, la masa de gas que involucra es pequeña y no existirá prácticamente absorción ni emisión de radiación por parte de la misma). Estos autores evaluaron la componente radiante del coeficiente de transferencia de calor radiante debido a las burbujas, $h_{rad,B}$, como:

$$h_{rad,B} = \sigma \left[\frac{1}{\epsilon_w} + F_{BW} \left(\frac{1}{\epsilon_D} - 1 \right) \right]^{-1} (T_w^2 + T_F^2)(T_w + T_F) \quad (17)$$

donde F_{BW} es el factor de visión desde la cara interna de la burbuja hacia la superficie de intercambio. Este valor será función de la relación de tamaño entre la burbuja y la superficie de intercambio.

Sea A_B el área de la superficie interna de la burbuja y A_W el área de la superficie de intercambio, se define el coeficiente ψ_A como la relación entre estas áreas. Luego

$$\psi_A = A_W / A_B \quad (18)$$

De acuerdo a la posición relativa existente entre la burbuja y la superficie de intercambio, Mazza (1993) adoptó como aproximación general el uso de la ecuación con F_{BW} evaluado mediante

$$F_{BW} = \min (0.5, \psi_A) \quad (19)$$

enfoque que se adoptó aquí.

3 METODOLOGIA

Para la evaluación del fenómeno estudiado mediante la técnica por CFD el *software* resuelve numéricamente la ecuación de Navier-Stokes, la ecuación de energía y la ecuación de transferencia de calor por radiación tanto para los sólidos como para el fluido. Las ecuaciones fueron resueltas en tres dimensiones utilizando el software FLUENT 6.3.26, el cual se vale del método de discretización de volúmenes finitos, asistido por el programa GAMBIT 2.2.30 para la generación de la malla.

La geometría total del sistema estudiado es mallada mediante volúmenes elementales. Este enfoque presenta una geometría en 3-D con partículas atravesadas por un fluido en régimen laminar.

Numéricamente, se cumplieron dos etapas. En la primera se utilizó la modalidad “fronteras periódicas” a fin de obtener el perfil de velocidades del gas al ingresar a la emulsión. Este último se introdujo en la segunda etapa como condición de borde, para realizar la simulación de la transferencia de calor transiente. Se considera que el agregado de partículas permanece en contacto con la superficie transfiriendo calor durante el tiempo de contacto, t_c .

3.1 Construcción de la geometría de la celda y generación de la malla

Para la realización de este trabajo, fue necesaria la construcción de dos celdas de cálculo de geometría tridimensional (Figura 3a), una cuyo propósito constituye solamente la obtención del perfil de velocidades al ingreso de la emulsión, para luego ingresarlo, como se ha mencionado, como una condición de borde en lo que corresponde a la segunda etapa de cálculo.

Tanto la primera celda como la segunda consideran a la fase emulsión compuesta por cuatro estratos de partículas esféricas limitadas por dos paredes planas. El número de estratos

adoptado se debe a que la transferencia de calor por radiación deja de ser influyente a partir del tercer estrato donde prácticamente no existe visión entre la pared y las partículas correspondientes.

Tomando en cuenta que es posible utilizar simetría, solamente se trabajó con una celda de cálculo que presenta un espesor correspondiente a un radio de partícula. Otra de las ventajas que presenta FLUENT y se utiliza en este trabajo es la posibilidad de ingresar perfiles de velocidad como condición de borde, evitando así la creación de una región de calma previa a la ubicación de las partículas que permita desarrollar el flujo.

Ozkaynak et al. (1981) presentan resultados para dos tamaños de partículas: $d_p = 1.03 \text{ mm}$ y $d_p = 0.733 \text{ mm}$. Para esta etapa del estudio se eligieron las últimas, correspondientes al tipo B de acuerdo a la clasificación de Geldart, considerando además un ordenamiento romboédrico de las mismas. Este arreglo fue adoptado en base a observaciones experimentales como la configuración que mejor representa el comportamiento de un lecho fluidizado en la zona adyacente a la pared (Mazza, 1993). Al alejarse de la superficie de intercambio el efecto “ordenador” de la misma comienza a decaer, las partículas se ubican aleatoriamente y pueden ser tratadas como un medio homogéneo. En la celda de cálculo, esta característica es atribuida a una placa plana, es decir, que es representativa del seno de la emulsión, mientras que la placa restante es utilizada para la obtención de los flujos radiantes.

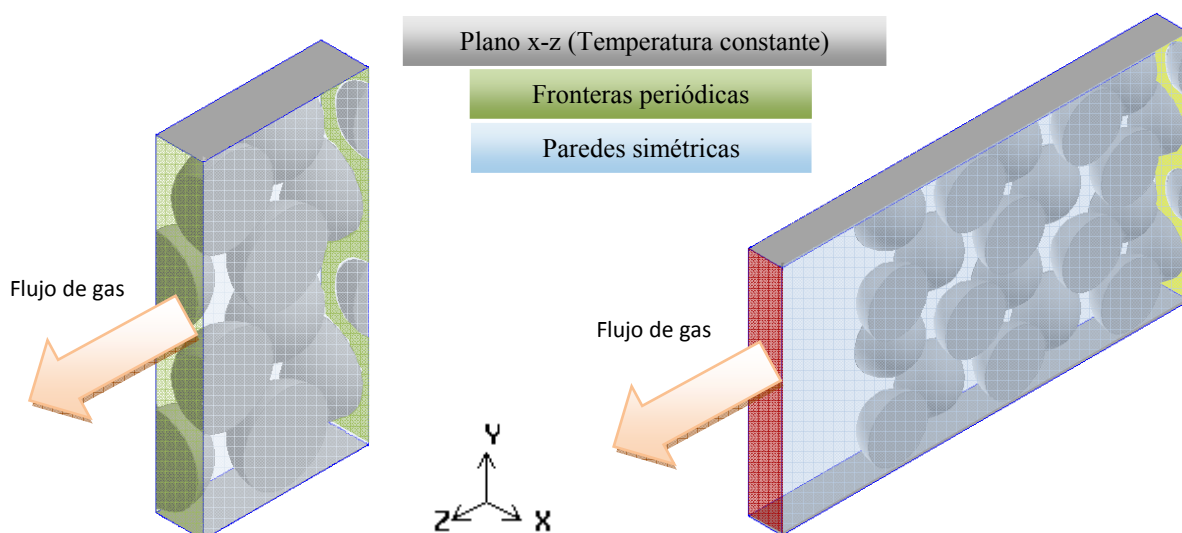


Figura 3a: Celda de cálculo para simulación estacionaria

Figura 3b: Celda de cálculo para simulación transiente

En la primera celda (Figura 3a) cada estrato está constituido por tres partículas, mientras que en la celda utilizada para la simulación en condiciones transientes (Figura 3b) cada estrato está compuesto por seis partículas. Otra característica distintiva de esta última celda es la incorporación de una zona de calma posterior a la fase densa evitando, de esta manera, el retroceso del fluido.

En ninguna de las dos celdas las partículas están en contacto estrictamente entre sí ni con las paredes, pues diversos autores (Nijemiesland et al. 2001) han indicado que la presencia de estos puntos de contacto provoca la distorsión de los volúmenes de control en las zonas adyacentes a los mismos, conduciendo a mallas de muy baja calidad. La distancia de separación entre las partículas y con la pared resultó de realizar la construcción de la celda donde la porosidad del medio se fijó en 0.5.

En lo concerniente a la generación de la malla, es necesario destacar que se efectuó un

mallado para el fluido circulante, considerando zonas críticas a aquellas donde la sección del pasaje del fluido se estrecha de manera notoria (puntos de contacto). Por ello es menester realizar un refinado de la malla en esas regiones. Por otro lado, una malla más abierta puede considerarse aceptable en la zona de calma. Se utilizó un mallado no estructural conformado por volúmenes tetraédricos.

En la construcción del mallado representativo del fluido, se utilizó la *función de tamaño (size function)*, logrando una malla más cerrada en las zonas identificadas como críticas tal cual se observa en la [Figura 4a](#). La función de tamaño requiere la definición de tres parámetros: tamaño inicial, velocidad de crecimiento y tamaño límite de los volúmenes de control. De esta manera es posible regular el crecimiento de la grilla a partir de un nodo o una superficie. Los valores utilizados en este trabajo son:

Tamaño inicial: 0.013 mm
Velocidad de crecimiento: 1.3
Tamaño límite: 0.031 mm

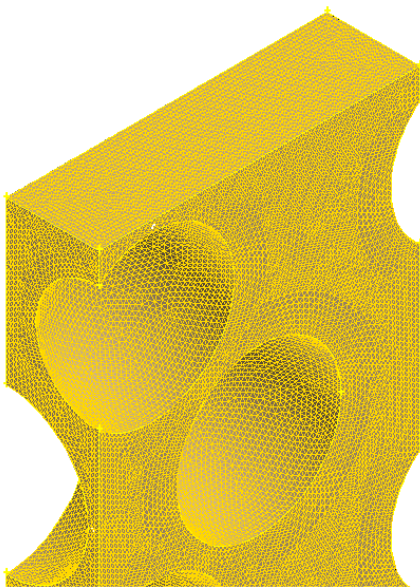


Figura 4a: Estructura del mallado del fluido

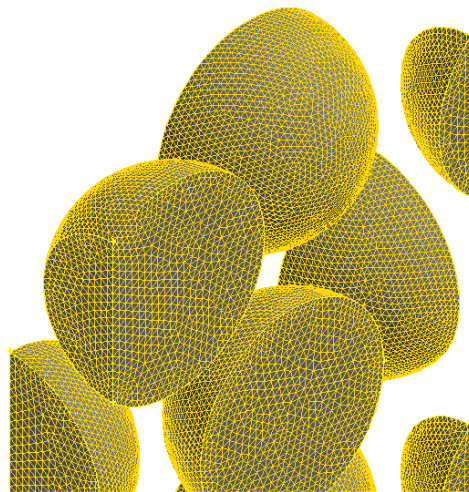


Figura 4b: Estructura del mallado de los sólidos

Una característica importante en este estudio es la realización del mallado de los sólidos ([Figura 4b](#)). Esto permite analizar la penetración de la transferencia de calor en las partículas modeladas, constituyendo una información sumamente valiosa en el estudio.

Para el mallado de los sólidos ([Figura 4b](#)), se utilizó la modalidad *Meshed*, la cual consiste en el mallado del volumen a partir de una cara previamente mallada. Este modo solicita el ingreso de dos parámetros: velocidad de crecimiento y tamaño final de los volúmenes de control. Los valores utilizados son:

Velocidad de crecimiento: 1.3
Tamaño límite: 0.036 mm

Por último se realizó la validación de la malla con el fin de verificar si la solución resultaba independiente de la malla. Se ensayaron mallas de distinta densidad hasta lograr identificar la de menor tamaño que lograba reproducir adecuadamente los parámetros *pérdida de carga* y *flujo de calor* radiante a través de la superficie de intercambio a temperatura constante. Estas pruebas de validación se realizaron en la celda de cálculo utilizada en la primera instancia. Este proceso permitió conocer las características del mallado a utilizar en la celda donde se efectuará la simulación en estado transiente arrojando como resultado una malla conformada

por 1568344 volúmenes de control.

3.2 Hipótesis adoptadas y condiciones de cálculo establecidas

La simulación transiente de la transferencia de calor radiante entre la fase densa de un Lecho Fluidizado y la pared sumergida por FLUENT se realizó bajo las siguientes hipótesis y condiciones:

1. La superficie de transferencia de calor es plana y está cubierta por la emulsión en todo momento (esto justifica la inclusión del perfil de velocidades al ingreso de la fase densa) de la simulación. El contacto con la burbuja no se simula por CFD.
2. Las partículas son esféricas y uniformes en lo que respecta a su tamaño.
3. Existe un pequeño espesor de gas entre la fase densa y la pared.
4. El agente fluidizante es aire, el cual es considerado como un medio no participante, es decir, no absorbe ni dispersa la radiación. Se lo evalúa como fluido incompresible.
5. La temperatura de la superficie de transferencia de calor es uniforme y constante.
6. La superficie es considerada como semitransparente y difusa, es decir, tanto la absorción como la emisión de radiación es independiente de la longitud de onda y de la dirección.
7. Se considera un valor finito de la conductividad térmica de las partículas.
8. La superficie de las partículas es mayor que la longitud de onda correspondiente a la temperatura de operación del lecho, se considera que es gris y difusa. La dispersión y absorción son independientes de la longitud de onda e isotrópicas.
9. Las propiedades radiantes de las partículas no cambian con la temperatura.

3.3 Parámetros y propiedades fluidodinámicas del estudio

El número de Reynolds para la fase densa se expresa como:

$$Re_D = \rho_g U d_p / \mu \quad (20)$$

y, para su evaluación, las propiedades termofísicas correspondientes al gas de fluidización para cada experiencia se obtuvieron del *Software* HYSIM C.2.50 correspondiente a la versión académica. Para cada simulación se supuso que las propiedades del gas y de las partículas de la emulsión permanecen constantes.

Para todas las simulaciones realizadas los valores de Re_D no superaron el valor de 20. Esto permite trabajar considerando al flujo del fluido intersticial como laminar, acortando los tiempos de cálculo. Esta consideración está sustentada por varios autores, entre ellos Rhodes (www.erpt.org/012Q/rhod-07.htm), que establecen que el flujo del mismo en partículas del grupo B de Geldart (las cuales corresponden a las utilizadas en este trabajo) es laminar. Luego la contribución convectiva del gas a la transferencia de calor no es dominante.

Los parámetros fluidodinámicos, es decir, el tiempo de contacto y la fracción de burbujas se calcularon a partir de las expresiones de Bock (1983). El diámetro de la burbuja a la altura donde se ubica la sonda que mide el flujo de calor se evaluó a partir de la correlación de Hilligardt y Werther (1985). La velocidad de mínima fluidización se estimó a partir de la expresión de Baeyens y Geldart (1974). Todas estas correlaciones se presentan en la Tabla IV.

3.4 Propiedades ópticas de las partículas existentes en el Lecho Fluidizado

El índice de refracción complejo se define como: $m = n - ki$. Si el índice de absorción es cero el material es transparente.

Hua et al. (2004) reportan que el 80% de la intensidad de radiación está en el rango de longitudes de onda de 0.5 a 7 μm alrededor de 850 °C, por ello se prestará atención a las

propiedades ópticas para longitudes de onda menores que 7 μm .

Tabla IV: Expresiones utilizadas para evaluar los parámetros fluidodinámicos

$$Re_{mf} = -57.09 + (1920 + 0.0564Ar^{1/1.07})^{0.535}$$

$$d_B = 0.0123[1 + 27(U - U_{mf})]^{0.33}(1 + 6.84\phi)^{0.5}$$

$$t_c = 2.5Z^{0.8} \left[\frac{d_p}{U - U_{mf}} \right]^{0.5} \left[\frac{(\rho_p - \rho_g)(1 - \delta_{mf})}{\rho_g} \right]^{0.4}$$

$$f_B = 0.15Z^{-0.65} \left(\frac{U - U_{mf}}{\sqrt{gd_e}} \right)^{0.5}$$

Donde, en los casos estudiados en este trabajo, $Z = \phi$ y $d_e = D_L$

3.4.1 Constantes ópticas de la arena

Lacroix et al. (2002) midieron los valores de n y k utilizando las transformadas de las señales de Kramers-Kronig. Estos resultados se presentan en la Figura 5. Se puede observar a simple vista que el material no es gris y que las propiedades ópticas dependen fuertemente de la longitud de onda. En el intervalo 0-7 μm , n varía de 1.5 a 1.1. Con respecto al índice de absorción, k , se utilizó el valor de 10^{-3} .

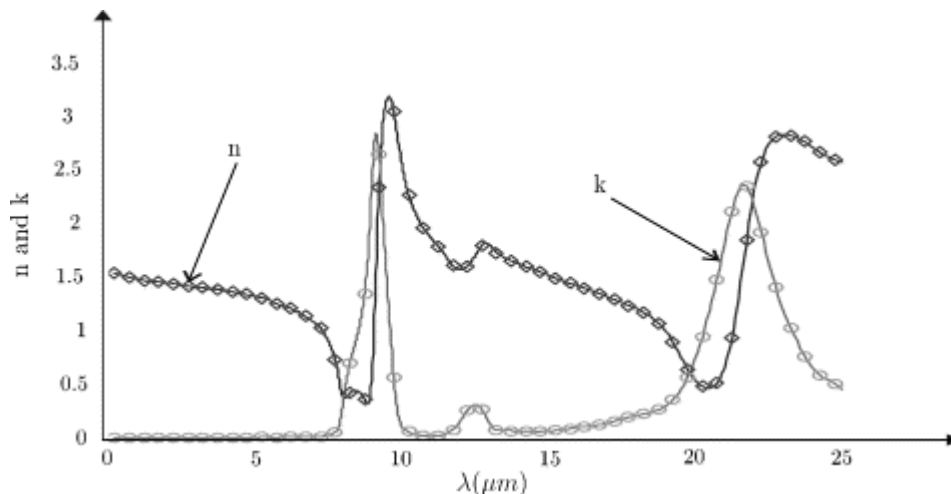


Figura 5: Propiedades ópticas de la arena según Lacroix et al. (2002)

3.4.2 Coeficientes de Absorción y dispersión

La obtención de los factores de eficiencia correspondientes a la absorción y emisión de las partículas presentes en la fase densa se realizó mediante la aplicación de la teoría de Mie. Boothroyd et al. (1987) comprobaron que este enfoque puede ser utilizado en lechos fluidizados, y Gurvich et al. (2001) verificaron su precisión para grandes valores de parámetro de tamaño.

Lacroix et al. (2002) además afirmaron que diversos autores han reportado que el coeficiente de absorción medido entre temperaturas que van de 800 °C a 1200 °C muestra una leve variación para longitudes de onda entre 1 μm y 4.5 μm . Teniendo en cuenta estas afirmaciones se adoptaron valores constantes para todas las simulaciones realizadas.

Los valores utilizados fueron los siguientes:

Parte real del índice de refracción n : 1.3

Índice de absorción k : 10^{-3}

En base a estos valores y estableciendo que el lecho opera a una temperatura

correspondiente a una longitud de onda de 4 μm , se obtuvieron los siguientes resultados de secciones transversales efectivas de absorción y dispersión:

$$Q_{abs} = 3.4506 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2$$

$$Q_{sca} = 5.1296 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2$$

$$Q_{ext} = 8.58 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2$$

Definiendo la densidad volumétrica del sólido como:

$$\varrho = 1/\frac{4}{3}\pi r_p^3 \quad (21)$$

Los coeficientes de absorción y dispersión resultan del producto de la densidad volumétrica del sólido y la sección transversal efectiva correspondiente. Luego, valores de los respectivos coeficientes son:

$$\beta_{abs} = 1673.34 \text{ m}^{-1}$$

$$\beta_{sca} = 2487.55 \text{ m}^{-1}$$

4 SOLUCION NUMERICA

Se utilizó el método basado en presiones para la resolución de la ecuación de Navier-Stokes. Esta decisión está fundada en que se recomienda la utilización de este método para fluidos de baja velocidad e incompresibles, características empleadas en este estudio.

Una de las ventajas resultantes de hallarse en régimen laminar de flujo, radica en la posibilidad de realizar iteraciones con esquemas de discretización de segundo orden, los cuales arrojan resultados más precisos.

En las simulaciones se modificaron los factores de subrelajación existentes por defecto para evitar la inestabilidad en la solución (pues altos valores, en especial el referido a la presión, conllevan problemas de estabilidad) alcanzando convergencia en un número menor de iteraciones. La [Tabla V](#) resume la información mencionada:

Tabla V: Principales parámetros de resolución

Variable	Factor de subrelajación	Discretización
Presión	0.5	PRESTO
Momento	0.5	Second order upwind
Energía	0.95	Second order upwind
Ordenadas discretas	0.95	Second order upwind

Las características citadas anteriormente se aplicaron para las dos celdas unitarias utilizadas. Como se ha puntualizado, para la celda más pequeña se trabajó en estado estacionario mientras que para la que posee una zona de calma se trabajó en estado transiente.

La ecuación de transferencia de calor por radiación se resolvió utilizando el método de Ordenadas Discretas. Se prefirió este método de resolución frente a otros presentados por FLUENT debido a la posibilidad de modelar paredes semitransparentes de distintos tipos permitiendo, luego, conocer el perfil de temperaturas dentro de las partículas.

El modelo de Ordenadas Discretas transforma la ecuación de transferencia de calor por radiación en una ecuación de transporte para la intensidad radiante en las coordenadas espaciales (x, y, z). Este modelo resuelve tantas ecuaciones de transporte como direcciones \vec{s} existan. Luego, para una dirección particular \vec{s} se tiene:

$$\nabla \cdot (I(\vec{r}, \vec{s}) \vec{s}) + (\beta_{abs} + \beta_{sca}) I(\vec{r}, \vec{s}) = \beta_{abs} n^2 \frac{\sigma T^4}{\pi} + \frac{\beta_{sca}}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(\vec{r}, \vec{s}') \Phi(\vec{s}, \vec{s}') d\Omega' \quad (22)$$

Este modelo requiere el ingreso de 2 parámetros: iteraciones de radiación por iteraciones

de flujo (que fue fijado en 1) y discretización angular, la cual presenta una subdivisión que solicita el ingreso de la cantidad de divisiones angulares y pixelación de las mismas. Al tener en cuenta que un aumento de estos dos parámetros incrementa considerablemente el tiempo de cálculo (en especial las divisiones angulares), se optó por trabajar con una división angular de 2x2 y una *pixelación* de 3x3. Cabe destacar que se realizaron simulaciones con valores mayores a los indicados pero la diferencia en los resultados resultó despreciable (menor que 1.5%), justificando así los valores de los parámetros usados.

4.1 Condiciones de Borde

Al simular las partículas atravesadas por el gas fluidizante, FLUENT separa a la interfase entre ellas en dos paredes, a las cuales se les puede ingresar condiciones de borde distintas, ya sea fijando la temperatura o el flujo de calor de cada una. También presenta la posibilidad de acoplar las dos paredes, opción utilizada en este trabajo. Asimismo se establecieron esas paredes como medios semitransparentes que presentan reflexión difusa y poseen una emisividad igual a 0.71 (valor propuesto por [Mazza \(1993\)](#) ante la ausencia del mismo en [Ozkaynak et al. \(1981\)](#)).

La condición de borde térmica de la superficie de intercambio de calor fue establecida en el valor correspondiente a la temperatura de la ventana reportada por [Ozkaynak et al. \(1981\)](#), T_w . Además, la superficie es tratada como una pared estacionaria que ostenta la condición de no deslizamiento. En lo referente a la radiación, se la consideró como una superficie semitransparente con reflexión difusa que recibe un flujo radiante desde el exterior simulando la radiación proveniente de la termopila. Cabe aclarar que hallándose la termopila a temperatura ambiente, el flujo radiante emitido por ella será despreciable al compararlo con el derivado del lecho.

Con respecto a las condiciones de borde del fluido al ingresar a la celda de control, se utilizó el perfil de velocidades obtenido anteriormente en la celda representada en la [Figura 3a](#), mientras que a la salida se fijó la presión. La temperatura de ingreso del fluido se fijó de acuerdo a los valores reportados por [Ozkaynak et al. \(1981\)](#) como temperatura del lecho T_F .

Por último, la pared opuesta a la superficie de intercambio se considera representativa del seno de la emulsión (que presenta un comportamiento homogéneo) con su temperatura reportada y emisividad obtenida a partir del Modelo Heterogéneo Generalizado. Al igual que en la superficie de intercambio, esta pared es especificada como una pared estacionaria sin deslizamiento.

4.2 Cálculo del coeficiente de transferencia de calor radiante debido a la fase densa,

$$h_{rad,D}$$

En el trabajo realizado por [Ozkaynak et al. \(1981\)](#), se calcula el coeficiente de transferencia de calor por radiación como

$$h_{rad}^{[EXP]} = q_{rad}/(T_F - T_w) \quad (23)$$

Los autores no reportaron la emisividad de la ventana, por ello el procedimiento para determinar la contribución de la fase burbuja al coeficiente de transferencia de calor radiante se lleva a cabo considerando que la termopila se comporta como un cuerpo negro con la emisividad propia del mismo e igual a uno ($e_s = 1$) y con una temperatura igual a $T_s = 298\text{ K}$. Además, en las experiencias analizadas, el diámetro de la burbuja (determinado mediante la correlación de [Hilligardt y Werther, 1985](#)) es mayor que el de la ventana, por lo que sería necesario considerar otras superficies adicionales para definir el comportamiento radiante. Sin embargo, se puede obtener una razonable aproximación utilizando un valor de

factor de visión igual a $F_{BW} = \psi_A = A_W / (A_B/2)$. Todo esto conduce a un nuevo coeficiente, el cual está referido a la termopila y se denomina $h_{rad,B}^{[EXP],s}$. Mayores detalles sobre la naturaleza de este coeficiente y su ecuación han sido presentados por [Mazza \(1993\)](#). Además, con T_s es posible calcular $h_{rad}^{[EXP],s}$ para luego obtener $h_{rad,D}^{[EXP],s}$. Finalmente, con la simple relación existente entre $h_{rad,D}^{[EXP],s}$ y $h_{rad,D}^{[EXP]}$ obtenemos este último.

Los valores de $h_{rad}^{[MHG]}$ se calcularon con el sistema (16). Nuevamente, para el cálculo de $h_{rad,D}^{[MHG]}$ se repite el mismo procedimiento explicado anteriormente.

Para la obtención de $h_{rad,D}$ mediante la CFD se trabajó en estado transiente, con un tamaño de paso de 0.01 seg y donde cada paso tiene un número de iteraciones de 50 con los residuos establecidos en 10^{-9} .

Para cada paso se recopiló el valor del flujo radiante medido en una fracción de la pared de la celda de cálculo. La longitud de esta superficie se determinó como aquella que está solamente cubierta por las partículas, es decir, no se tuvo en cuenta la región correspondiente a la zona de calma pues ella no contiene ninguna partícula. Con ello, se obtuvieron distintos valores de flujo radiante para distintos tiempos. Estos datos se ingresaron en el *Software* MATHEMATICA 4.0 y se realizó una regresión para obtener una ecuación que ajuste correctamente al conjunto de datos involucrados.

Una vez obtenida la ecuación se calculó el flujo radiante promedio debido a la fase densa sobre la superficie de intercambio como:

$$\bar{q}_{rad,D}^{[CFD]} = \frac{\int_0^{t_c} q_{rad,D}^{[CFD]}(t) dt}{t_c} \quad (24)$$

Finalmente el coeficiente de transferencia de calor radiante medio se calculó como:

$$h_{rad,D}^{[CFD]} = \frac{\bar{q}_{rad,D}^{[CFD]}}{T_F - T_W} \quad (25)$$

5 RESULTADOS Y DISCUSION

La [Tabla VI](#), resume los valores de $h_{rad,D}$ para varias de las experiencias reportadas por [Ozkaynak et al. \(1981\)](#), los calculados por el MHG y los obtenidos mediante la CFD.

Con referencia a los valores experimentales, se define y calcula el error porcentual en cada caso, mediante:

$$e\% = 100 \frac{h_{rad,D}^{[EXP]} - h_{rad,D}^i}{h_{rad,D}^{[EXP]}}; \quad i = [MHG], [CFD] \quad (26)$$

Puede apreciarse una concordancia muy buena entre los valores calculados de h_{rad} por MHG y experimentales y también entre estos últimos y los resultantes de la CFD (ver [Figura 6](#)). El cálculo por CFD permite así reunir nueva evidencia de la aplicabilidad del MHG. En relación a las diferencias (no demasiado significativas) entre los calculados por CFD y las mediciones experimentales deben citarse algunos factores en los que pueden residir causas de las mismas:

Debido a que [Ozkaynak et al. \(1981\)](#), no indicaron la emisividad de las partículas se adoptó un valor igual a 0.71.

Las propiedades ópticas de las partículas cumplen un rol muy importante sobre h_{rad} . Una gran incertidumbre presenta el índice de absorción de la arena, ya que según [Yamada et al. \(1995\)](#) este índice se puede ubicar entre 10^{-2} y 10^{-4} . Además estos autores señalan cómo una disminución de k aumenta el coeficiente h_{rad} significativamente. Este incremento de h_{rad} se

debe a una mayor penetración de la radiación entre la superficie y las partículas del lecho.

Tabla VI: Valores de $h_{rad,D}$ para los enfoque por CFD y MHG comparados con los respectivos valores experimentales

Ozkaynak et al. (1981)				MHG		CFD	
$T_F [K]$	$T_w [K]$	$U [m/s]$	$h_{rad,D}^{[EXP]} [W/(m^2 K)]$	$h_{rad,D}^{[MHG]} [W/(m^2 K)]$	$e\%$	$h_{rad,D}^{[CFD]} [W/(m^2 K)]$	$e\%$
1005.1	409.1	1.944	58.2408	58.9046	-1.1	55.275	5.1
315.7	586.2	0.923	12.4889	14.6827	-17.6	13.5687	-8.6
1031.3	488.1	1.520	79.3812	63.3222	20.2	64.866	18.3
967.4	457.2	1.952	67.0874	58.8247	12.3	56.106	16.4
836.7	425.6	1.811	50.7395	40.2424	20.7	39.646	21.9
673.1	386.6	1.349	31.0865	24.1453	22.3	22.93	26.2
905.2	434.2	2.026	61.7888	50.5834	18.1	47.405	23.3
873.8	436	2.25	53.573	48.4898	9.5	45.08	15.9
769.7	336.9	1.386	34.136	28.1286	17.6	26.596	22.1
799.2	366.9	1.442	39.2981	32.5739	18.4	26.085	34.6
1016.3	413.4	1.948	58.6846	60.5719	-3.2	61.015	-4.0
1016.4	471.7	3.313	67.3433	74.1913	-10.2	66.504	1.2
962.1	449.9	1.975	67.4261	57.8081	14.3	54.44	19.3
1010.6	409.3	1.815	59.0711	58.193	1.5	55.116	6.7
1005.7	415.7	1.806	56.6679	58.1167	-2.6	55.169	2.6

Otra consideración no tomada en cuenta en la simulación por CFD fue el movimiento relativo de las partículas y el movimiento de las mismas a lo largo de la superficie de intercambio. Molerus et al. (1995) mostró la existencia de componentes radiales y rotacionales en el movimiento de las partículas cercanas a la superficie y, por lo tanto, el tiempo de contacto para cada partícula adyacente a la pared no es constante.

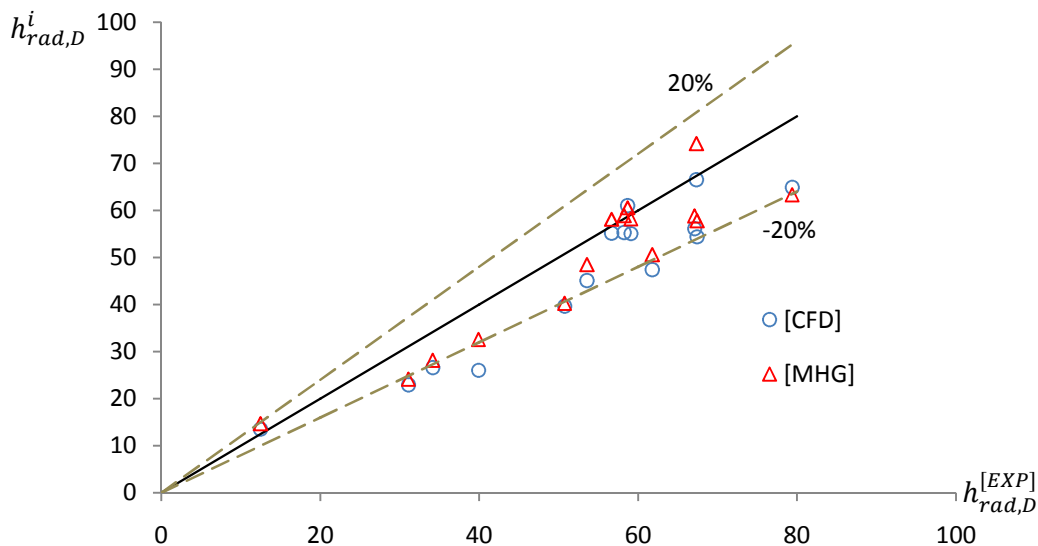


Figura 6: comparación entre $h_{rad,D}^{[EXP]}$ para los casos estudiados y los valores calculados por CFD y predichos por el MHG

La Figura 7 muestra la evolución en el perfil de temperaturas presente en las partículas pertenecientes a la fase emulsión junto con la superficie sumergida para tiempos de contacto

crecientes. Como se puede observar, los perfiles de temperatura para distancias menores a un diámetro de partícula son significativamente dependiente del valor de t_c . Si bien, en general, para distancias mayores a un diámetro de partícula desde la pared de intercambio, la distribución de temperatura es relativamente homogénea, resulta evidente el avance de la penetración térmica conforme aumenta el tiempo. Estos resultados indican que la resistencia fundamental correspondiente a la transferencia de calor entre la fase densa y la pared puede ser circunscripta a la capa de partículas adyacentes a la superficie de intercambio, validando así la modelización de la emulsión en dos zonas realizada por el MHG para la transferencia de calor. Otra observación a realizar es la presencia de un gradiente de temperatura dentro de las partículas en contacto con la pared, donde la diferencia de temperatura entre los extremos de las mismas se encuentra alrededor de 90°C.

6 CONCLUSIONES

La transferencia de calor entre un lecho fluidizado a altas temperaturas y una superficie sumergida se simuló mediante la técnica de CFD, a través del soporte FLUENT y sus resultados se compararon con los valores calculados por el modelo mecanístico MHG y resultados experimentales de bibliografía.

Los resultados indican que tanto la implementación de una simulación microscópica por CFD como la aplicación del MHG para cuantificar la transferencia de calor radiante entre la fase emulsión y una superficie de intercambio pueden resultar convenientes, validando la primera la utilización de la segunda, más rápida y ágil. Adicionalmente se ha constituido y probado una metodología válida basada en la CFD para la evaluación de la velocidad de transferencia de calor fase densa-pared de la superficie sumergida, esencialmente a altas temperaturas.

Se demostró la existencia de un perfil de temperatura dentro de las partículas adyacentes a la pared (las cuales poseen baja conductividad), los cuales están en concordancia con algunos resultados existentes en bibliografía. Por lo tanto, la simplificación de un perfil de temperatura plano dentro de un sólido poco conductor en inmediaciones de la superficie de intercambio no sería representativa de la realidad para la radiación.

La distribución de temperatura dentro de la fase densa depende tanto de la conducción como de la radiación. Por lo tanto es fundamental considerar la interacción entre ambos mecanismos.

La evidencia proveniente de los resultados indica la importancia de considerar la zona adyacente a la pared como una zona heterogénea. Otro aspecto a tener en cuenta en lo que respecta a esta región es que los gradientes de temperatura expuestos indican que la consideración de propiedades termofísicas constantes no es representativa de la realidad.

Para finalizar, debería realizarse mayor investigación en lo concerniente a las propiedades ópticas de las partículas para que, con ello, se logren resultados más precisos. El análisis del cálculo de h_{wp} constituye una etapa próxima del trabajo.

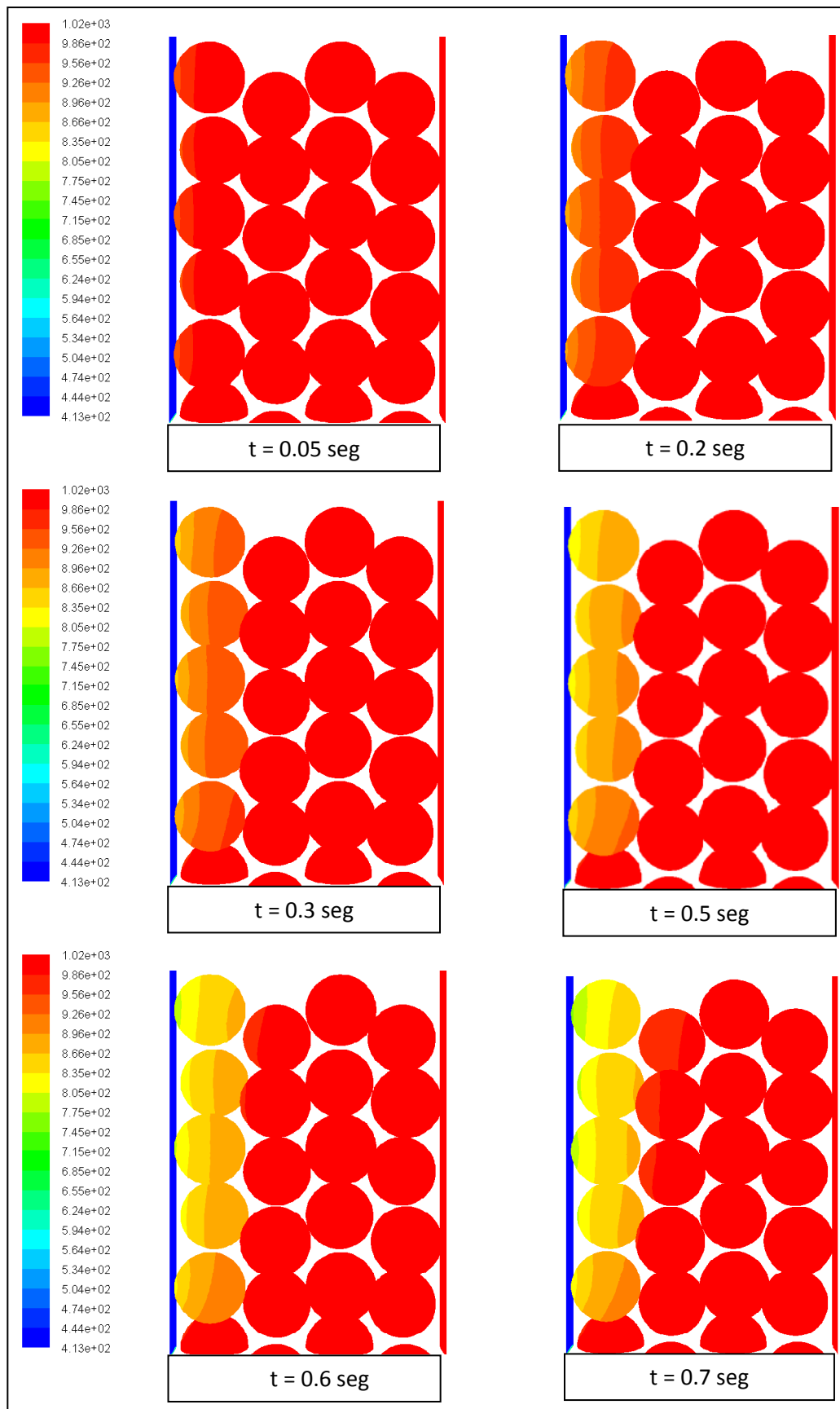


Figura 7: Perfiles de Temperatura para la emulsión a distintos valores de tiempo de contacto. $T_F=1016.3\text{K}$, $T_w=413.4\text{ K}$, $U=1.948\text{ m/s}$

NOMENCLATURA

a_L	absortividad del estrato, (adimensional)
Ar	$d_p^3 \rho_g (\rho_p - \rho_g) g / \mu_g$, número de Arquímedes
$C_{P,D}$	capacidad calorífica volumétrica de la fase densa, ($J m^{-3} K^{-1}$)
$C_{P,g}$	capacidad calorífica volumétrica del gas, ($J m^{-3} K^{-1}$)
$C_{P,p}$	capacidad calorífica volumétrica de las partículas, ($J m^{-3} K^{-1}$)
d_B	diámetro medio de burbuja, (m)
d_e	diámetro equivalente del lecho fluidizado, (m)
D_L	diámetro del lecho, (m)
d_p	diámetro de la partícula, (m)
d_T	diámetro del dispositivo de medición, (m)
e_D	emisividad de la fase densa, (adimensional)
e_p	emisividad de la partícula, (adimensional)
e_s	emisividad del sumidero de radiación, (adimensional)
e_w	emisividad de la ventana, (adimensional)
f_B	fracción volumétrica de burbujas en el lecho, (adimensional)
F_{BW}	factor de visión desde la cara interna de la burbuja hacia la superficie de intercambio, (adimensional)
f_w	$\pi N_p d_p^2 / 4$, fracción del área superficial correspondiente al área de las partículas, (adimensional)
g	aceleración de la gravedad, ($m s^{-2}$)
h	coeficiente total de transferencia de calor lecho-superficie, ($W m^{-2} K^{-1}$)
h_B	coeficiente de transferencia de calor burbuja-superficie, ($W m^{-2} K^{-1}$)
h_D	coeficiente de transferencia de calor fase densa-superficie, ($W m^{-2} K^{-1}$)
h_L	coeficiente de transferencia de calor entre dos estratos consecutivos, ($W m^{-2} K^{-1}$)
h_{rad}	coeficiente de transferencia de calor radiante referido a $(T_F - T_w)$, ($W m^{-2} K^{-1}$)
h_{rad}^s	coeficiente de transferencia de calor radiante referido a $(T_F - T_s)$, ($W m^{-2} K^{-1}$)
$h_{rad,B}$	coeficiente de transferencia de calor radiante en la fase burbuja, ($W m^{-2} K^{-1}$)
$h_{rad,D}$	coeficiente de transferencia de calor radiante en la fase densa, ($W m^{-2} K^{-1}$)
h_{wg}	coeficiente de transferencia de calor sobre la pared para la fase gaseosa, ($W m^{-2} K^{-1}$)
h_{wp}	coeficiente de transferencia de calor entre el primer estrato de partículas y la superficie sumergida, ($W m^{-2} K^{-1}$)
I	Intensidad de radiación, ($W m^{-2}$)
k	índice de absorción, (adimensional)

k	conductividad térmica, ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$)
K	k_p/k_g , razón de conductividades térmicas, (adimensional)
k_{eg}	conductividad térmica efectiva del gas, ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$)
k_{ep}	conductividad térmica efectiva de la partícula, ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$)
k_g	conductividad térmica del gas, ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$)
k_p	conductividad térmica del sólido, ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$)
k_{rad}	conductividad efectiva radiante, ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$)
ℓ_0	espesor efectivo entre la primera capa de partículas y la superficie de transferencia de calor, (m)
ℓ_s	camino libre medio modificado de acuerdo al efecto Smoluchowski, (m)
L_w	longitud de la superficie vertical de transferencia de calor, (m)
m	índice de refracción complejo, (adimensional)
n	índice de refracción, (adimensional)
N_p	concentración de partículas del estrato (m^{-2})
Nu_{wp}	$h_{wp}d_p/k_g$, número de Nusselt para la transferencia de calor entre la primera capa de partículas y la superficie sumergida
Pr	$C_{p,g}\mu_g/k_g\rho_g$, número de Prandtl
Q_{abs}	sección transversal efectiva de absorción, (m^2)
Q_{ext}	sección transversal efectiva de extinción, (m^2)
q_{rad}	flujo radiante por unidad de área, (W m^{-2})
Q_{sca}	sección transversal efectiva de dispersión, (m^2)
\vec{r}	vector posición
Re_D	$\rho_g U_g d_p / \mu_g$, número de Reynolds para la fase densa
Re_{mf}	$U_{mf} d_p \rho_g / \mu_g$, número de Reynolds en las condiciones de mínima fluidización
r_L	reflectividad del estrato, (adimensional)
\vec{s}	vector dirección
\vec{s}'	vector dirección de dispersión
T	Temperatura local, (K)
t_c	tiempo de contacto, (s)
T_F	temperatura del seno del lecho, (K)
T_{g0}	temperatura media del gas intersticial sobre la pared, (K)
t_L	transmisividad del estrato, (adimensional)
T_p	temperatura de la partícula, (K)
T_s	temperatura del sumidero de radiación, (K)

T_w	temperatura de la ventana del dispositivo de medición, (K)
U	velocidad superficial del gas fluidizante, (m s^{-1})
U_D	velocidad superficial del gas en la fase densa, (m s^{-1})
U_g	velocidad superficial del gas en la zona heterogénea del MHG, (m s^{-1})
U_{mf}	velocidad superficial del gas en condiciones de mínima fluidización, (m s^{-1})
Z	longitud efectiva en la correlación de Bock, (m)

Símbolos griegos

β_{abs}	coeficiente de absorción, (m^{-1})
β_{sca}	coeficiente de dispersión, (m^{-1})
δ_D	porosidad de la fase densa, (adimensional)
δ_g	porosidad media en la zona heterogénea del MHG, (adimensional)
δ_{mf}	porosidad del lecho en las condiciones de mínima fluidización, (adimensional)
Δ	distancia entre los centros de partículas adyacentes pertenecientes a estratos consecutivos, (m)
ρ_g	densidad del gas, (Kg m^{-3})
ρ_p	densidad de la partícula, (Kg m^{-3})
ϱ	densidad volumétrica de la partícula, (m^{-3})
μ_g	viscosidad del gas, ($\text{Kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$)
σ	constante de Stefan-Boltzmann, ($\text{W m}^{-2} \text{K}^{-4}$)
ϕ	distancia del dispositivo de medición al distribuidor, (m)
Φ	función de fase, (adimensional)
Ω'	ángulo sólido, (rad)

REFERENCIAS

- Baeyens, J., and Geldart, D., Predictive calculations of flow parameters in gas fluidized beds and fluidization behavior of various powders. *Proc. Int. Symp. Fluidization and its applications*, 163, 1974.
- Barreto, G.F., and Mazza, G.D., Modelling heat transfer between bubbling fluidized beds and immersed surfaces. *Trends in Chemical Engineering*, 3:81-101, 1996.
- Bock, H.J., Heat transfer in fluidized beds. *Preprints 4th Int. Conf. on Fluidization, Kashikojima, Japan*, 5.2.1-5.2.8, 1983.
- Boothroyd, S.A., Jones, A.R., Nicholson, K., and Wood, W.R., Light scattering by fly ash and the applicability of Mie theory. *Comb. Flame*, 69:235-241, 1987.
- Decker, N.A., and Glicksman, L.R., Heat transfer in large particle fluidized beds. *Int. Jou. Heat and Mass Transfer*, 26:1307-1320, 1983.
- Flamant, G., Fatah, N., Olalde, G. and Hernandez, D., Temperature distribution near a heat exchanger wall immersed in high temperature packed and fluidized beds. *ASME Journal of Heat Transfer*, 114:50-55, 1992.

- Flamant, G., Lu, J.D., and Variot, B., Towards a generalized model for vertical wall to gas-solid fluidized beds heat transfer. II. Radiative Transfer and Temperature Effects. *Chem. Eng. Sci.*, 48:2493-2503, 1993b.
- Gurvich, I., Shiloah, N., and Kleiman, M., Calculations of the Mie scattering coefficients for multilayered particles with large size parameters. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 70:433-440, 2001.
- Hillgardt, K., and Werther, J., Local bubble hold-up and expansion of gas-solid fluidized beds. *Germ. Chem. Eng.*, 9:215-221, 1986.
- Hua, Y., Flamant, G., Lu, J., and Gauthier D., 3d modelling of radiative heat transfer in circulating fluidized bed combustors: influence of particle composition. *Int. Jou. Of Heat and Mass Transfer*, 48:1145-1154, 2004.
- Lacroix, D., Parent, G., Asllanaj, and F., Jeandel, G., Coupled radiative and conductive heat transfer in a non-grey absorbing and emitting semitransparent media under collimated radiation. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 75:589-609, 2002.
- Lu, J.D., Flamant, G., and Snabre, G., Towards a generalized model for vertical wall to gas-solid fluidized beds heat transfer. I. Particle convection and gas conduction. *Chem. Eng. Sci.*, 48:2479-2492, 1993a.
- Mazza, G.D., Análisis de la transferencia de calor entre un lecho fluidizado y superficies sumergidas. *Tesis Doctoral*, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata, Argentina, 1993.
- Mazza, G.D., and Barreto, G.F., Analysis for models for heat transfer between gas-fluidized beds and immersed surfaces at high temperatures. *Powder Technology*, 75:173-179, 1993.
- Mazza, G.D., Berto, C.A., and Barreto, G.F., Evaluation of radiative heat transfer properties in dense particulate media. *Powder Technology*, 67:137-144, 1991.
- Mazza, G.D., Bressa, S.P. and Barreto, G.F., On the validity of the addition of independent contribution for evaluating heat transfer rates in gas fluidized beds. *Powder Technology*, 90:1-11, 1997a.
- Mazza, G.D., Mariani, N.J., and Barreto, G.F., Evaluation of Overall heat transfer rates between bubbling fluidized beds and immersed surfaces. *Chem. Eng. Comm.*, 162:93-123, 1997b.
- Molerus, O., Burshka, A., and Dietz, S., Particle migration at solid surface and heat transfer in bubbling fluidized beds – 1. Particle migration system. *Chem. Eng. Sci.*, 50:871-877, 1995.
- Nijemiesland, M., and Dixon, A.G., Comparison of CFD simulations to experiment for convective heat transfer in gas-solid fixed bed. *Chem. Eng. Jou.*, 82:231, 2001.
- Ozkaynak, T.F., Chen, J.C., and Frankenfield, T.R., Heat transfer in high temperature fluidized beds. Institute of Thermo-Fluid Engineering and Science, Lehigh University, 1981.
- Papageorgiou, J.N., and Froment, G.F., Simulation models accounting for radial voidage profiles in fixed-bed reactors. *Chem. Eng. Sci.*, 50:3043-3056, 1995.
- Wang, L., Wu, P., and Ni, X., Surface-particle-emulsion model of heat transfer between a fluidized bed and an immersed surface. *Powder Technology*, 149:127-138, 2005.
- Yamada, J., Kurosaki, Y., Satoh, I., and Shimada, K., Radiative Heat Exchange between a Fluidized Bed and Heated Surface. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 11:135-142, 1995.
- Yoshida, K., Ueno, T., and Kunii, D., Mechanism of Bed-Wall Heat Transfer in a Fluidized Bed at High Temperatures *Chem. Eng. Sci.*, 29:77-82, 1974.